

Záróbeszámoló

Az egymáson elmozduló terhelésátadó szerkezeti elemek élettartamát és tönkremenetelét alapvetően befolyásolja a kopás, ezért az érintkezési, hőtani és a kopási viszonyok feltárása és előre jelzése fontos része az alkatrészek tervezésének. Napjainkban a műszaki polimerek egyre nagyobb teret hódítanak a gépészeti alkalmazásokban, és számos egyéb területen is.

1. Az anyagi viselkedés jellemzése

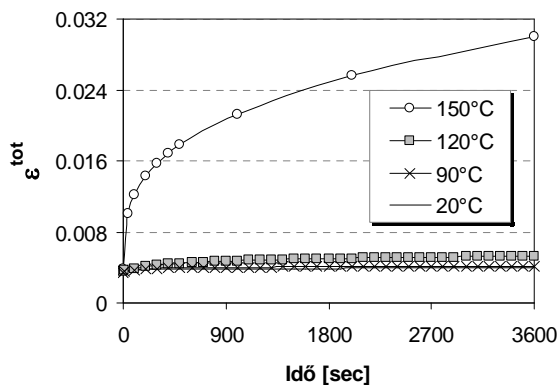
Először összefoglaljuk az érintkezési, hőtani és kopási viselkedés megbízható jellemzéséhez szükséges anyagjellemzőket.

1.1 Viszkoelasztikus anyagmodell hőmérsékletfüggő anyagjellemzőkkel

A polimerek alkalmazhatóságát nehezíti, hogy mechanikai és környezeti hatásokkal szemben jelentős érzékenységet mutatnak. Tulajdonságaik időtartam függősége miatt a fémek méretezéséhez használt alapösszefüggések közvetlenül nem használhatóak. Mechanikai kényszer melletti viselkedésük alapján a polimerek viszkoelasztikus anyagnak tekinthetők. A polimer anyagok időfüggő viselkedésének jellegzetességei a kúszás (az igénybevételi feszültség szintje konstans, $\sigma = \text{konst.}$) és a feszültség relaxáció (az igénybevételi alakváltozás szintje konstans, $\varepsilon = \text{konst.}$).

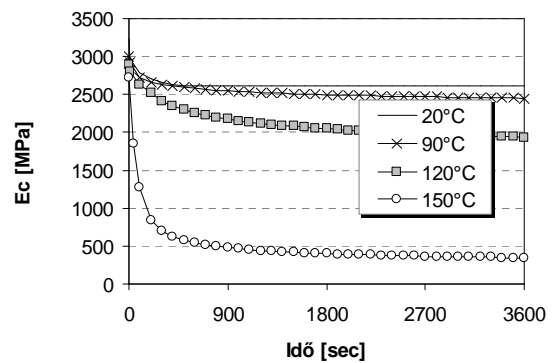
A polimerek alakváltozási tulajdonságait jelentősen befolyásolhatják az idő mellett a különböző környezeti hatások, mint a hőmérséklet, nedvességtartalom, feszültség, rezgések, stb. Vizsgálataink kapcsán a hőmérséklet hatása volt az, amire külön hangsúlyt fektettünk. A már korábban említett folyamatokat (feszültség relaxáció, kúszás) a hőmérséklet változása igen erőteljesen befolyásolja, magasabb hőmérsékleten a kúszás és relaxáció folyamata felgyorsul.

A vizsgálatainkban felhasznált egyik anyag a PEEKTM (poliéter-éterketon) (Victrex® PLC) részben kristályos, lineáris aromás polimer, mely széles körben elfogadott, mint a jelenleg elérhető egyik legnagyobb teljesítőképességű termoplasztikus anyag. A PEEK polimer és kompozitjai jól meghatározott üvegesedési hőmérséklettel rendelkeznek (143°C), olvadáspontja 343°C. Tartós üzemi hőmérséklete akár 260°C is lehet. A PEEK-nek kitűnő szilárdsági, sűrűlási és kopási jellemzői vannak. Kiemelkedő kopásállóságot mutat a nyomás, a sebesség, a hőmérséklet és az ellenfelület érdességének széles tartományán. A PEEK anyag kúszási jellemzőinek meghatározásához méréseket végeztünk különböző hőmérsékleteken. Az alakváltozás (1. ábra) és a kúszási modulusok összehasonlító diagramján (2. ábra) jól látszik, hogy a kúszás jelensége az üvegesedési hőmérséklet alatt nem számottevő. A T_g alatt (kb. 150°C) az alakváltozás ε mértéke 0,004-0,006 tartományban mozog (ld. 20, 90, 120 °C-os görbék). Ezzel szemben a 150 °C-os hőmérsékleten ennek közel tízszeresét is eléri az alakváltozás mértéke $t=1h$ múlva (1. ábra).



1. ábra.

A PEEK alakváltozás idő diagramja (1 óra)

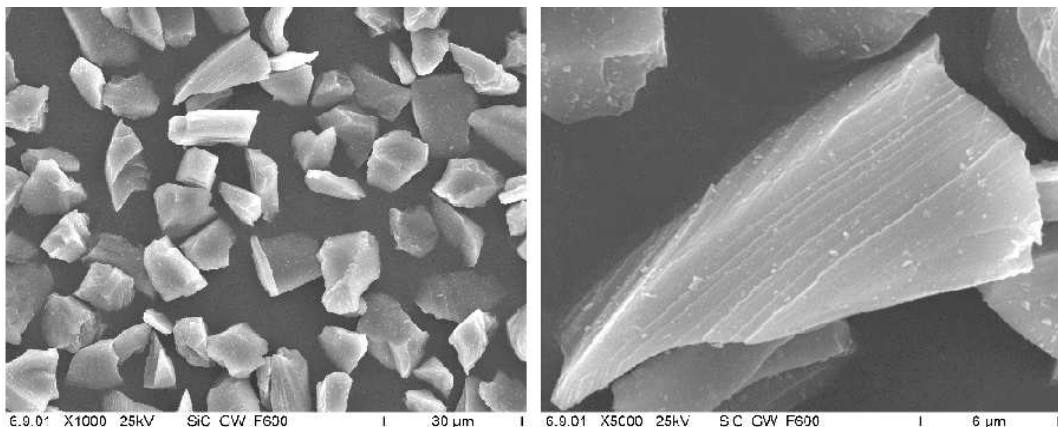


2. ábra.

A PEEK kúszási moduluszainak változása különböző hőmérsékleten

1.2 Funkcionálisan rétegzett anyagok (FGM) mechanikai jellemzése

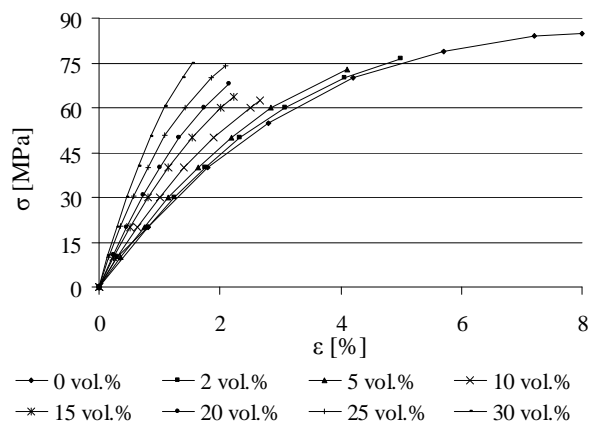
A kutatás célja a funkcionálisan rétegzett gradiens (FG) SiC erősítőrészecskéket tartalmazó epoxi mátrixú kompozitok mechanikai és kopási tulajdonságainak megismerése volt. A rétegzett szerkezetet centrifugálással állítottuk elő a gyanta térhálósodása közben. Az erősítőrészecskék szabálytalan alakúak, durva éllel rendelkeznek (3. ábra).



3. ábra.

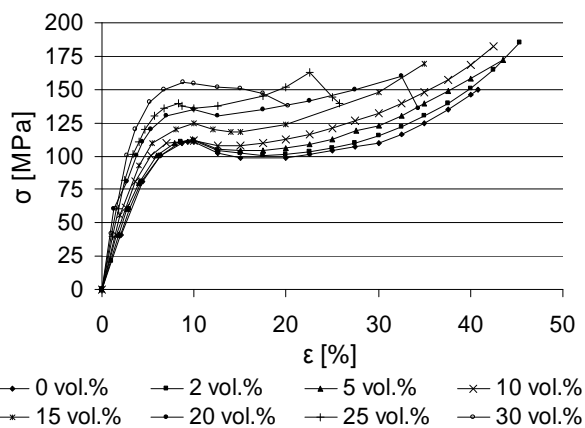
Elektronmikroszkópos felvétel az erősítőrészecskékről.

Egyenletes anyageloszlású próbatesteken húzó és nyomóvizsgálatokat végeztünk egy univerzális vizsgálóberendezésen (ZWICK 1485, Germany) 1 mm/min vizsgálati sebességgel.



4. ábra.

Húzó σ - ϵ görbék SiC/EP kompozitokra



5. ábra.

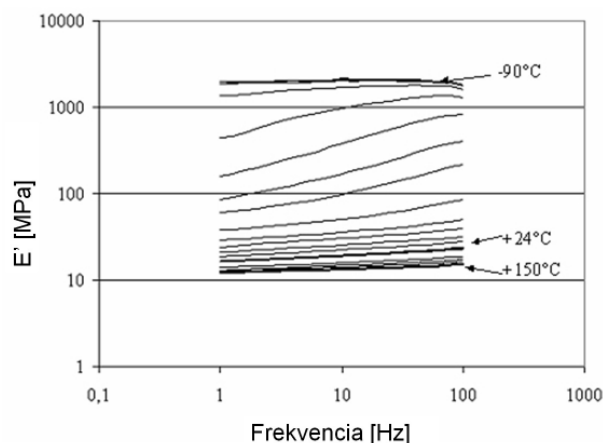
Nyomó σ - ϵ görbék SiC/EP kompozit

A 4. és 5. ábra a SiC/EP kompozitok húzó és nyomóvizsgálatainak σ - ϵ görbéit mutatja. Mind a tiszta gyanta, mind a SiC/EP kompozit, jóval nagyobb alakváltozást visel el nyomó igénybevételre, mint húzásra.

1.3 Elasztomer anyagok jellemzése

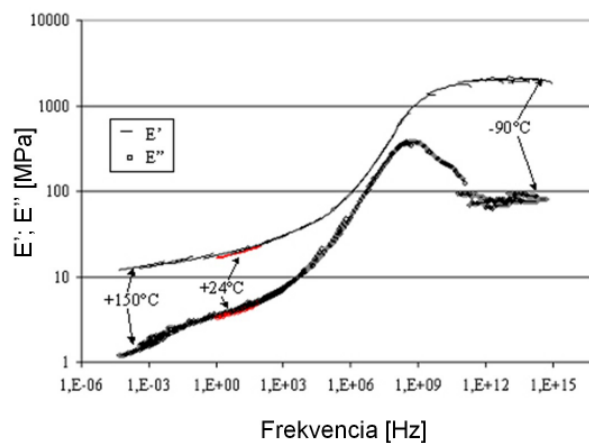
A gumi időfüggő anyagi viselkedésének meghatározásához DMTA vagy feszültség-relaxációs mérés szükséges. A DMTA mérés során a próbatestet adott frekvenciatartományban, változó frekvenciájú, szinuszosan változó dinamikus terhelésnek tesszük ki, úgy hogy közben hőmérsékletsöprést hajtunk végre. Az általunk mért frekvenciatartomány 1 és 100 Hz közé esett, úgy hogy a hőmérséklet $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig változott, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os lépésközzel. A mérésre a kaiserslauterni Kompozit Anyagok Intézetében (Kaiserslautern, IVW) került sor a GABO Eplexor 100 N DMTA mérő berendezésen.

A DMTA mérés eredménye az anyag komplex rugalmassági modulusa (E^*), a tárolási modulusa (E'), a veszteségi modulusa (E''), és a veszteségi tényezője ($\tan(\delta)$). A mért görbéket vízszintesen – a WLF (Williams–Landel–Ferry) hőmérséklet idő ekvivalencia elvet követve – összetolhatjuk úgy, hogy a görbék közül egyet referencia görbeként kijelölünk és a többi görbét ehhez képest toljuk el úgy, hogy egy folytonos görbét, mestergörbét kapjunk (6. ábra és 7. ábra). Ez a mestergörbe széles frekvenciatartományban képes ezek után jellemezni a vizsgált anyagot a kiválasztott referencia hőmérsékleten.



6. ábra.

A különböző hőmérsékleteken lemért tárolási modulus (E') a frekvencia függvényében



7. ábra.

A mért tárolási és veszteségi modulusból 24 °C referencia hőmérsékletre megszerkesztett tárolási modulus és veszteség modulus mestergörbék

A mestergörbére rugókból és csillapítás tagokból álló általánosított Maxwell modell illeszthető. A Maxwell modell segítségével lehetőség nyílik a véges elemes modellben az anyag viszkoelasztikus viselkedésének kezelésére. A ViscoData software az anyag mért tárolási modulusára ráilleszti a rugómodellt jellemző görbét, és közben meghatározza a rugómodellt leíró energia (e) és csillapítás (τ) paramétereket. A ViscoData software-vel leírt általánosított Maxwell modell relaxációs modulusa (1); tárolási modulusa (2); veszteségi modulusa (3) és veszteségi tényezője (4) a következő összefüggésekkel számítható:

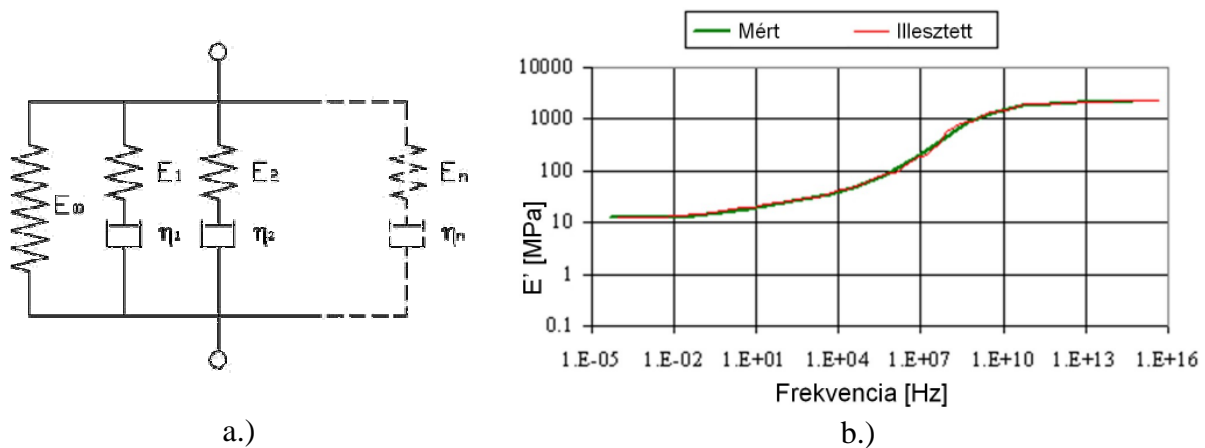
$$E(t; T_g) = E_\infty + \sum_{i=1}^n (E_i) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

$$E'(\omega, T_g) = E_o \left[1 - \sum_{i=1}^N e_i \frac{1}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (2)$$

$$E''(\omega, T_g) = E_o \cdot \sum_{i=1}^N e_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (3)$$

$$\tan(\delta, T_g) = \frac{E''(\delta, T_g)}{E'(\delta, T_g)} \quad (4)$$

Az általánosított Maxwell modell elvi ábráját és az illesztett tárolási modulus görbét a 8. ábra mutatja.



8. ábra.

a.) az általánosított Maxwell modell elvi ábrája;

b.) a mérésből és a görbeillesztésből kapott tárolási modulus mestergörbék 24 °C-on

2. Érintkezési, hőtani és kopási szimuláció

Polimer anyagok esetében a hőmérséklet változása, a hőtágulás és az időfüggő sajátosságok befolyásolják az alkatrész anyagjellemzőit és kopott geometriáját, mely hatásokat a kopási szimulációs modellekben vehetjük figyelembe (9. ábra).

A kopási folyamat végeselemes modellezése gyakran a lineáris kopáselméleten alapul. A kezdeti paraméterek a modell geometria, a terhelések, a kényszerek, és a kopási modell paraméterei illetve az anyagtulajdonságok. A modell geometriájának definiálása után az érintkezési állapot meghatározása szükséges. Ily módon ismert lesz az érintkezési tartomány mérete és elhelyezkedése.

Minden egyes szimulációs lépésben a rendszerparaméterek konstansok és meghatározzák a kopási mélységet minden csomópontban, követve az alábbi diszkretizált kopási modellt: A növekményes eljárás szerint az i -edik csomópontban a j -edik megoldási lépésben a kopási mélység

$$h_{j,i} = h_{j-1,i} + \Delta h_{j,i} \quad (5)$$

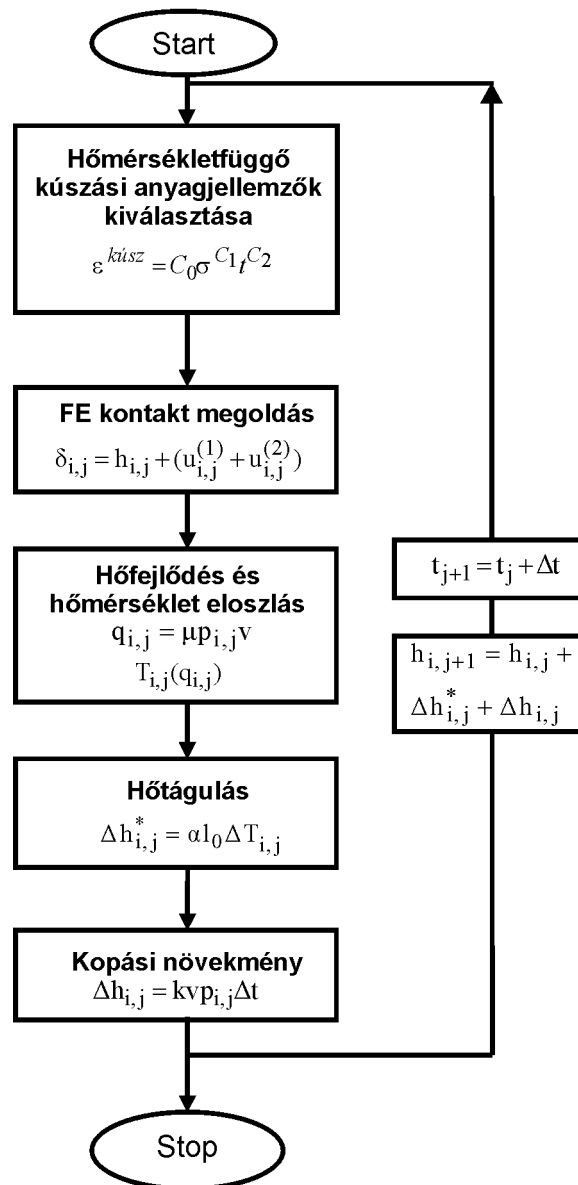
ahol a $\Delta h_{j,i}$ a kopási növekmény [mm] az i -edik csomópontban a j -edik megoldási lépésben.

A csomóponti kopási növekmények meghatározása konstans Δt időnövekmény esetén:

$$\Delta h_{j,i} = k(p_{j,i}v)\Delta t, \quad (6)$$

ahol v a csúszási sebesség, k fajlagos kopási tényező és $p_{j,i}$ az érintkezési nyomás az előző értelmezés szerint.

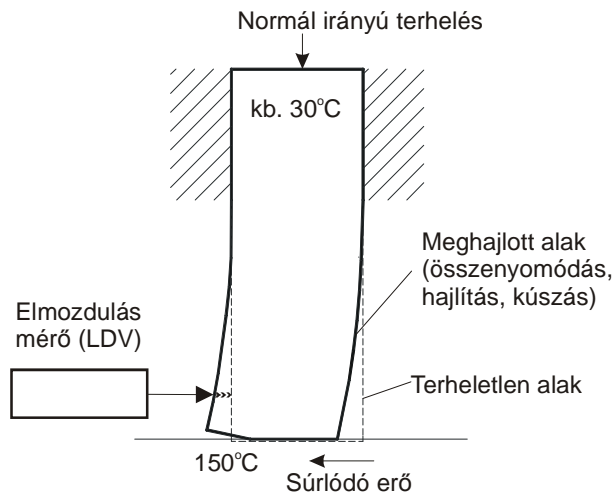
A blokkdiagramban a fajlagos kúszás a Bailey-Norton törvény szerint határozható meg míg a hőfejlődés összefüggésében a súrlódási tényező is szerepel az eddig ismertetett paramétereken túlmenően.



9. ábra.
A kopási algoritmus fő elemei

2.1 Pin-on-disc mérési elrendezés hőtani és kopási szimulációja

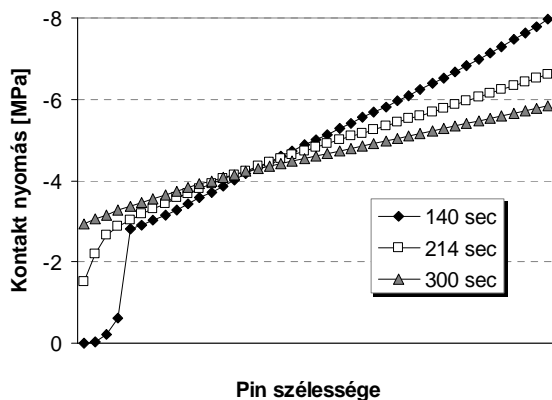
A 10. ábrán a próbatest kopási vizsgálat alatti viselkedésének sematikus vázlata látható. A PEEK pin a normál irányú terhelés hatására összenyomódik, míg a súrlódó erő hatására ezzel egyidejűleg meghajlik. Az ábrán látható, hogy a próbatesten kezdetben – a meghajlás miatt – élszerű felfekvés jön létre. Ahogy a kopás miatt az érintkezési tartomány szélesedik (majd végül bekövetkezik a teljes bekopás) a próbatest elhajlása fokozatosan nő. Ezt a hatást a kúszás is erősíti, hiszen ha a kopás hatására a pin elhajlása nem nőne, a viskoelasztikus anyag miatt (időben változó anyagjellemzők) akkor is bekövetkezne az elhajlás növekedése.



10. ábra Az elhajlásmérés sematikus elrendezése

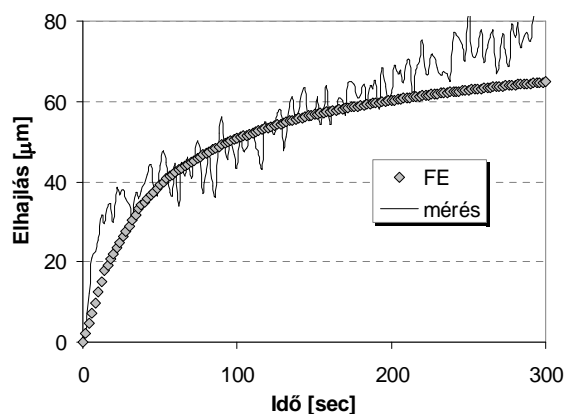
A 11. ábrán láthatók a pin kopásának különböző fázisaira jellemző érintkezési nyomáseloszlások. A próbatest 140 sec alatt kapta meg a teljes terhelést és összhangban azzal, hogy az érintkezési tartomány csak a próbatest keresztmetszetének egy hányadára terjed ki, a sarokfelfekvésnél viszonylag magas érintkezési nyomás alakul ki. Ahogy a kopás következtében az érintkezési tartomány szélessége növekszik és eléri a próbatest teljes szélességét (214 sec) a nyomás csúcserő csökken. A további kopás pedig egyre inkább csökkenti az érintkezési tartomány két szélén tapasztalható különbséget (300 sec) és közelít a névleges $p=4\text{MPa}$ értékhez ($F_N/A_{\text{pin}} = 64 \text{ N}/16 \text{ mm}^2$).

A 12. ábra a lézeres elhajlásmérés és a végeleemes modellből kapott elhajlás összehasonlítása látható a 0-300 sec időtartományban. A számított és a mért eredmények jó egyezést mutatnak.



11. ábra.

Az érintkezési nyomáseloszlás változása

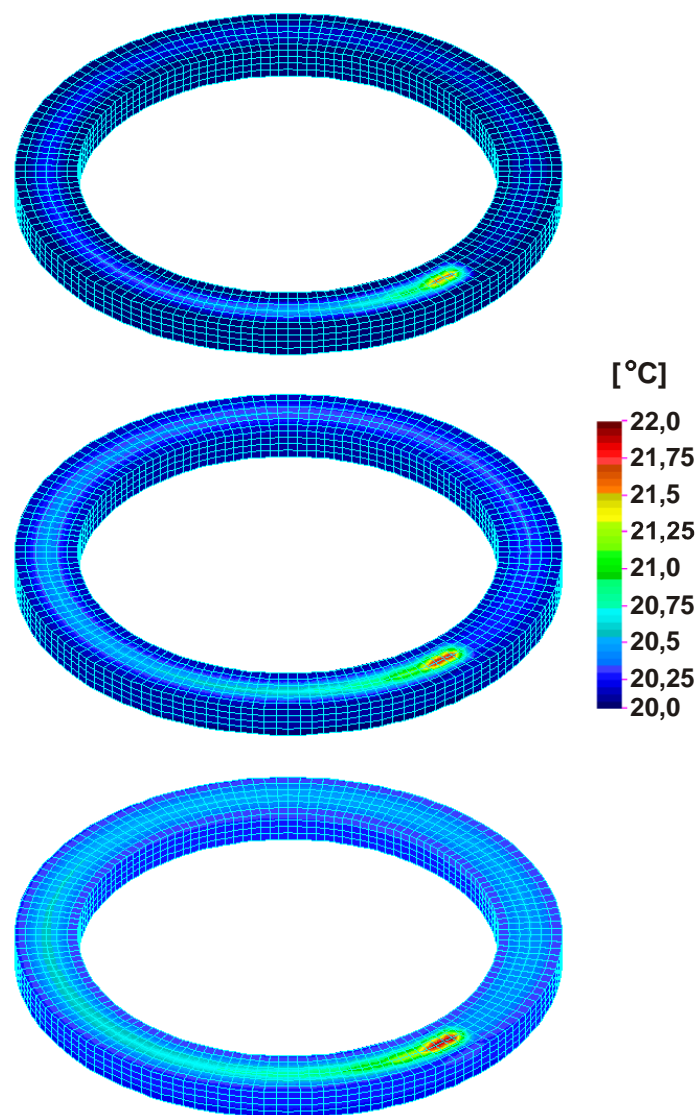


12. ábra.

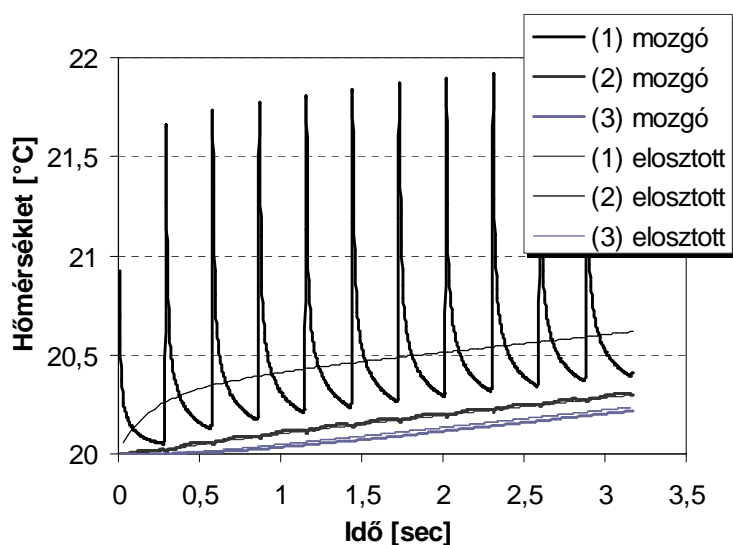
A pin elhajlása

Egyenletes sebességű körmozgást végző hőforrás esetén a mozgó hőforrás (13. ábra) hőmérsékleti ingadozást okoz a test felszínközeli anyagrétegében. Ennek a hatásnak a vizsgálatára végeleemes modelleket készítettük. Az 14. ábra mutatja, hogy a mozgó hőforrás a felszínen okoz hőmérsékleti ingadozást, az alatt a jelenség egyre kevésbé érezhető. Ha a valóságos körülményeket tekintve azt is figyelembe vesszük, hogy a hőtani végeleemes modellekbe beépített kontakt hőellenállás a kapcsolódó alkatrészekben tovább csökkenti ezt a hatást – hővezetés szempontjából „fojtásként” viselkedve – akkor belátható, hogy ez a hatás

gyakorlatilag megszűnik a csatlakozó alkatrészekben és a mozgó hőforrásos modell jól helyettesíthető elosztott hőforrású modellel.



13. ábra.
A mozgó hőforrásos modell eredményei 1, 6 és 11 fordulat után

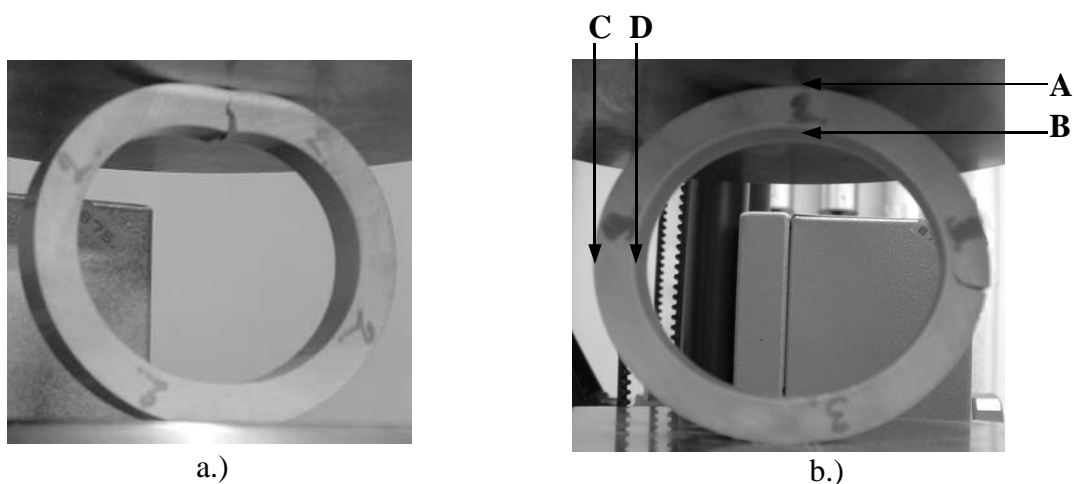


14. ábra.

A körmozgást végző és elosztott hőforrás hatásának összehasonlítása ($p=1$ MPa, $v=1$ m/s)

2.2 FGM gyűrűk nyomóvizsgálata és modellezése

Kísérleteket végeztünk a különböző anyageloszlású próbatestek strukturális tulajdonságainak meghatározására. A próbatestek készítése során változtattuk a centrifugálás sebességét, idejét és keverék viszkozitását.

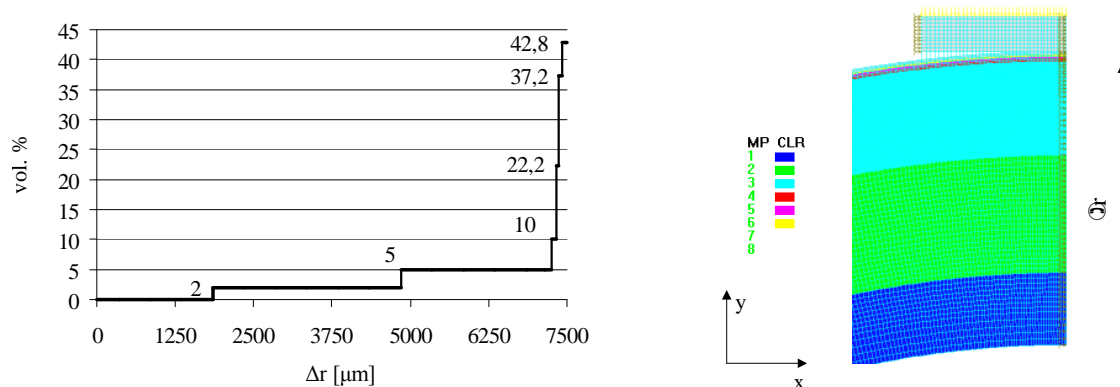


15. ábra.

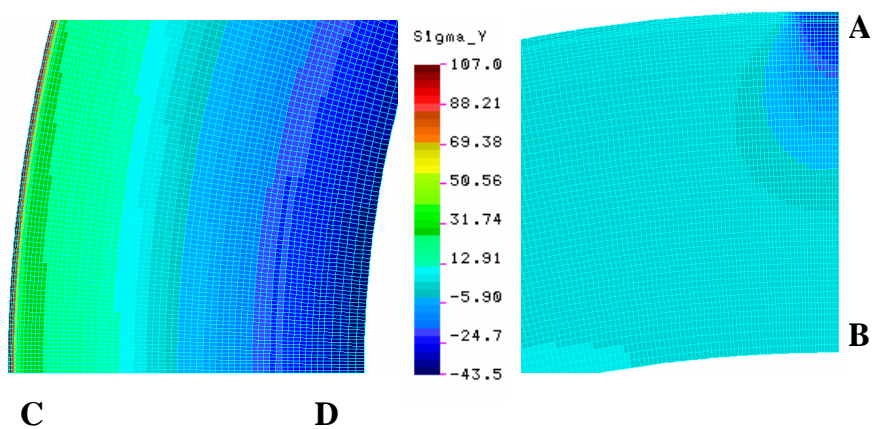
A gyűrűk tönkremenetele nyomóterhelés következtében
(a) egyenletes anyageloszlású (b) FG gyűrű

A nyomóvizsgálatok során (15. ábra) a gradiens gyűrűk merevebbnek mutatkoztak, de hamarabb következik be esetükben a törés, mint a tiszta gyantából készült, vagy egyenletes anyageloszlású gyűrűk esetében. Az FG gyűrűk esetében a törés a gyűrű külső felszínén, a szimmetriasík jobb vagy bal oldalán következett be. A tiszta gyanta és az egyenletes anyageloszlású kompozit gyűrűk esetében a törés a gyűrűk belsejében, alul vagy felül következett be.

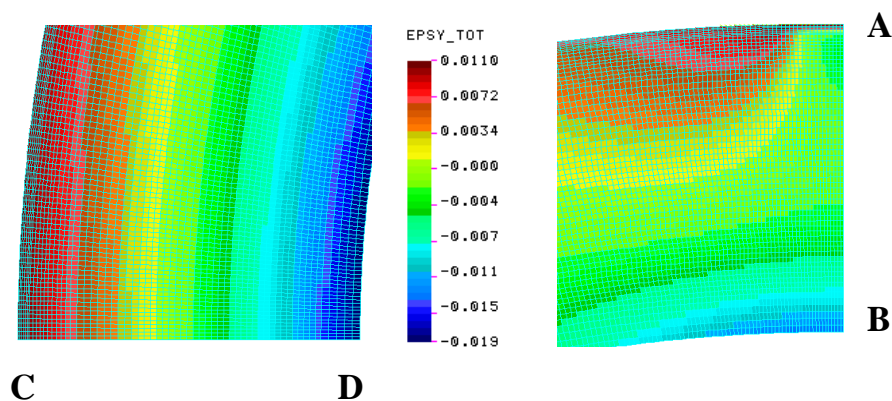
A 16. ábra a végeelem modell egyes rétegeinek SiC térfogatszázalék tartalmát mutatja meg. A különböző rétegek különböző színnel vannak ábrázolva. Minden réteghez hozzá van rendelve a megfelelő húzó és nyomó σ - ϵ függvény.



16. ábra.
Átlagos SiC tartalom és az FG gyűrű rétegei

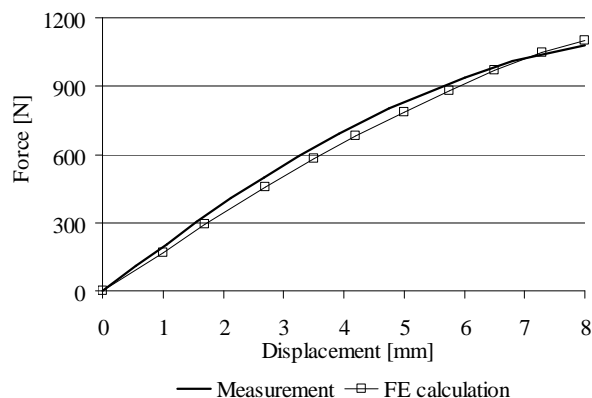


17. ábra.
A σ_y feszültségeloszlás az FG gyűrűben 713 N hatására



18. ábra.
Az ϵ_y alakváltozás eloszlás az FG gyűrűben 713 N hatására

A 17. ábra és a 18. ábra azt mutatja, hogy nagy feszültség és alakváltozás a gyűrű külső peremén alakul ki. Ennek oka a külső rétegben található magas SiC térfogatszázalék tartalom.



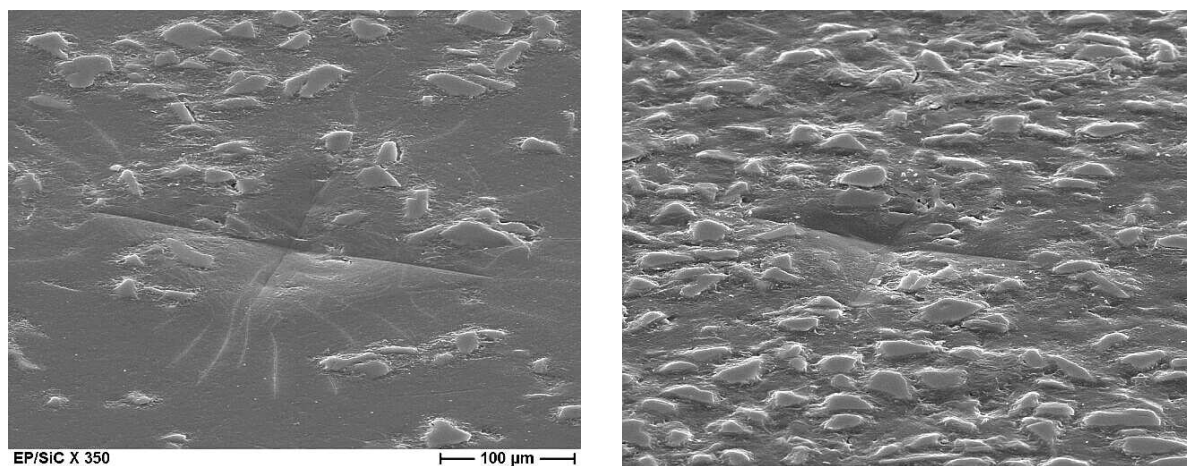
19. ábra.

Erő elmozdulás görbe. Mérési és számítási eredmények

A 19. ábra szerint, hogy a mérési és számítási eredmények jól egyeznek. A gyűrűk végesselembes modelljei helyesen mutatják a gyűrűk valóságos viselkedését.

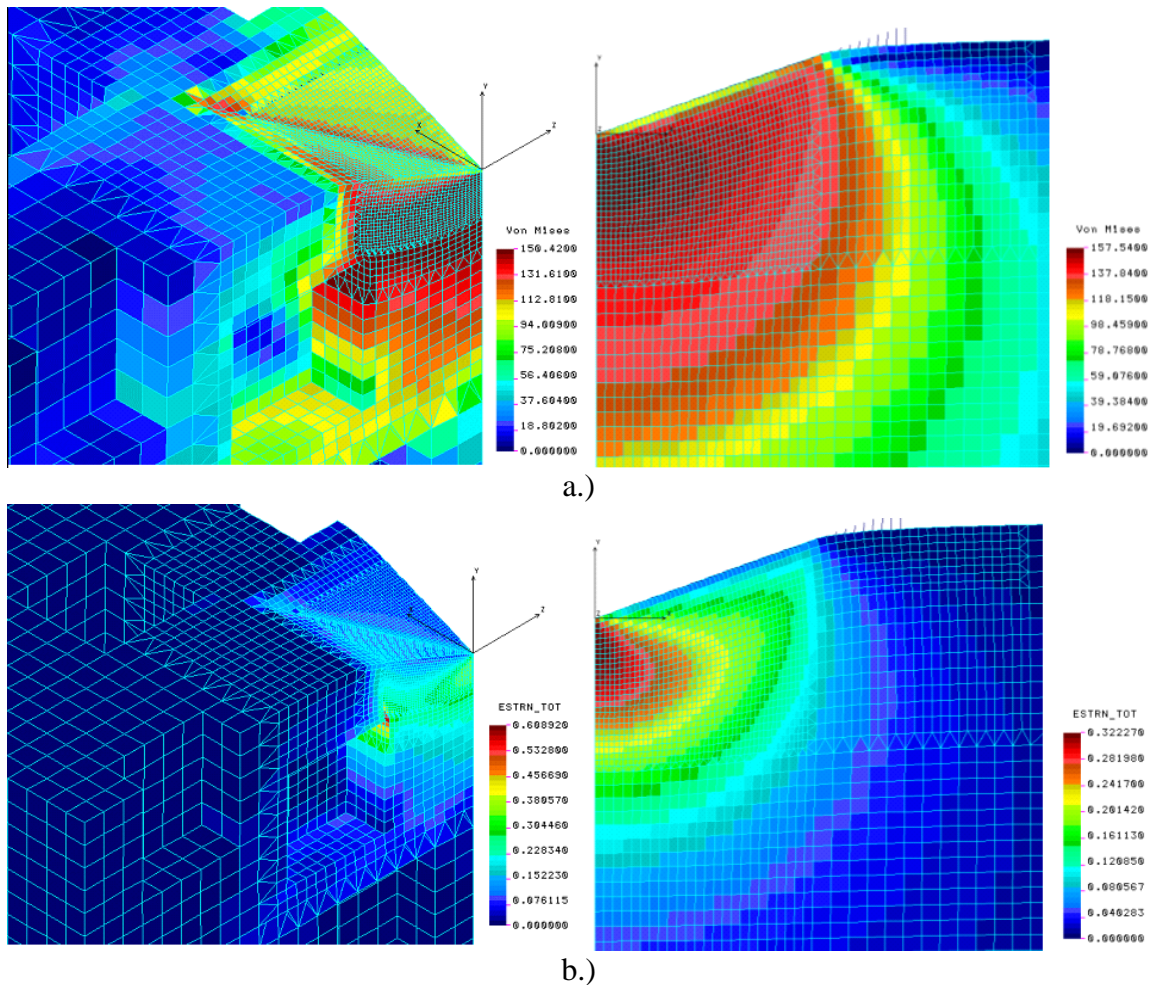
2.3 FGM gyűrűkön végzett mikro-keménység mérések modellezése

A próbatestek keresztmetszetében mikro-keménység méréseket végeztünk a tribológiai jellemzők (alakváltozás, feszültségek, tönkremeneteli mechanizmusok, stb.) meghatározására. Az 20. ábra a mátrixban mikrorepedéseket valamint a gyémántgúla szélein nagymérvű képlékeny alakváltozásokat mutat.



20. ábra.

Elektronmikroszkóp felvételek a lenyomatokról



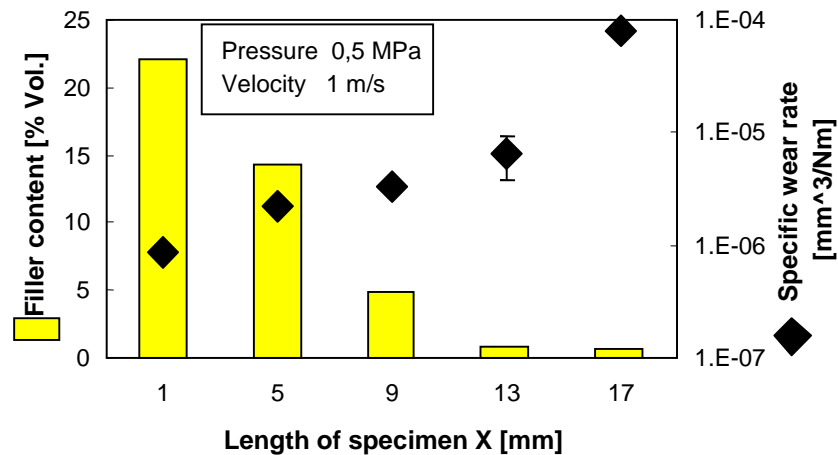
21. ábra.

A von Mises egyenértékű feszültségi (a) és egyenértékű alakváltozási (b) eredmények az érintkezési tartomány közelében, a 3D-s mikro-modellben és a 2D-s modellen

A 3D-s modell a 21. ábra világosan megmutatja a SiC erősítőrészecskék hatását a mátrixban. A feszültség és alakváltozás-eloszlás szerint a legnagyobb feszültség és alakváltozási csúcsok az erősítőrészecskék éleinél és sarkainál alakulnak ki. Ez nem adódik tovább az anyag mélyebb rétegeibe. A beágyazott részecskék a beágyazásuk egész felületén adják tovább a terhelést a mátrixnak. A terhelt részecskék környezetében a mátrix anyagának roncsolódása az elektronmikroszkópos felvételeken is megfigyelhető.

Kopási tulajdonság

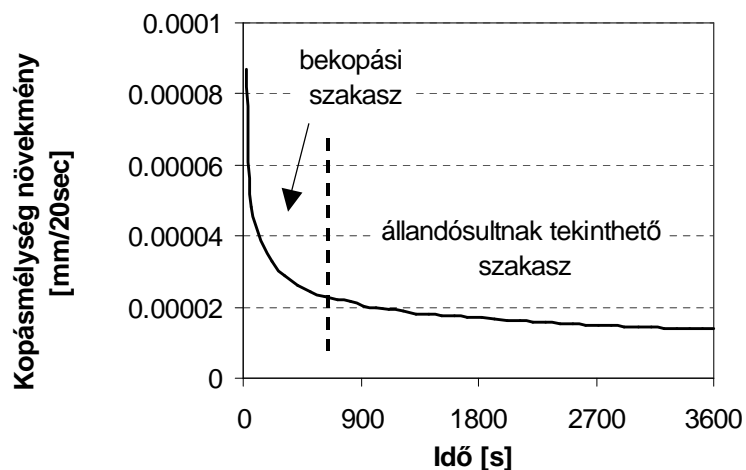
Különböző anyagú, gradiens szerkezetű próbatestek sorozatán vizsgálatokat végeztünk. A 22. ábra egy példát mutat arra, hogy hogyan változik a gradiens próbatest keresztmetszetében az erősítőrészecskék térfogatszázaléka és a kompozit fajlagos kopása. A külső zónákban, ahol az erősítőrészecskék részaránya magas (a centrifugálás hatása miatt), a fajlagos kopási arány jóval kisebb, mint a próbatest belseje felé haladva, ahol szinte nincs is erősítőrészecske.



22. ábra.

Fajlagos kopási arány az erősítőrészeske tartalom arányában (a próbatesteket különböző helyekről vágtuk ki Aramid részeske/epoxigyanta mintákból)

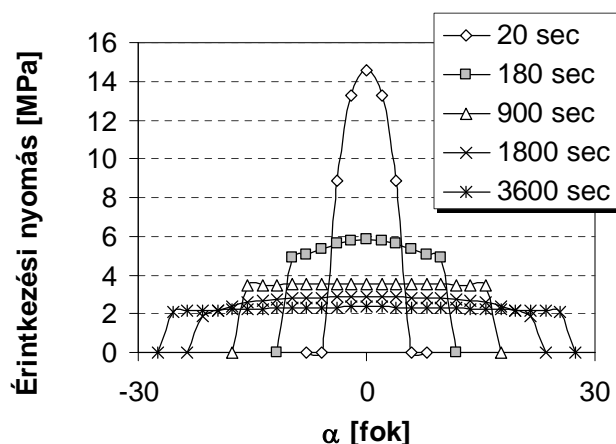
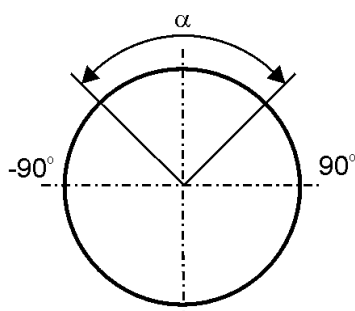
2.4. Hibrid csapágy kopási és hőtani szimulációja



23. ábra.

Kopási mélység növekmény időbeli változása $\Delta t=20$ sec időnövekmény esetén

A geometria sajátosságaiból (henger-henger érintkezés) és a kopási térfogat állandóságából adódóan, az egyes időlépésekhez ($\Delta t=20$ sec a FEM modellben) egyre kisebb kopási mélység növekmény tartozik (23. ábra).

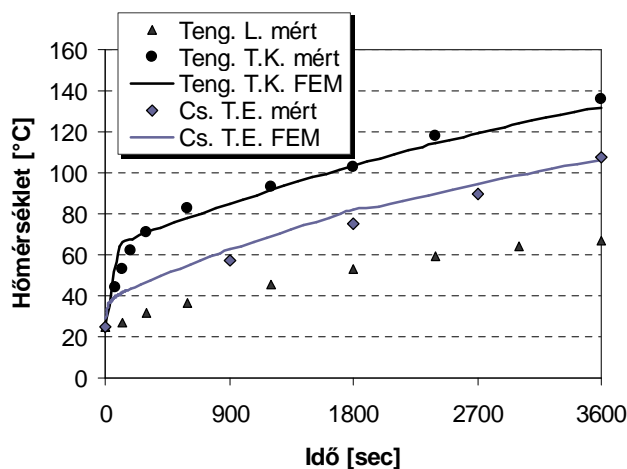


24. ábra.

Az érintkezési nyomás eloszlása a $-30^{\circ} \dots +30^{\circ}$ szögtartományban

A szobahőmérsékleti érintkezési nyomást bemutató eredmények a 24. ábra láthatóak $t=20$, 180, 900, 1800 és 3600 másodperc elteltével. Az érintkezési nyomás csúcserőke jelentős csökkenést mutat a kopás következtében.

A hőtani modellel meghatározható a közvetlenül nem mérhető érintkezési tartománybeli hőmérséklet. Az érintkezési tartománybeli hőmérséklet eloszlás ismerete különösen polimer anyagok esetén hasznos tervezői információ, mivel a polimerekre általában jellemző a mechanikai és hőtani tulajdonságok hőmérsékletfüggése, ami jelentős hatással lehet a kopási viselkedésre is.



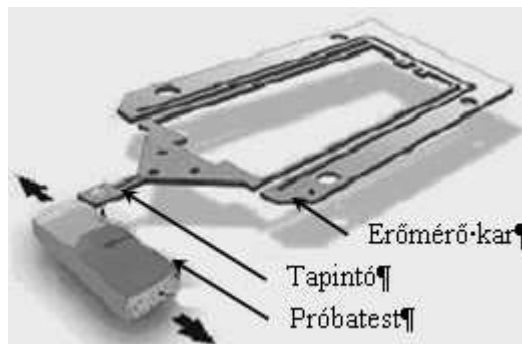
25. ábra.

Mért és számított hőmérsékletek a tengely homlokl felületén és a csapágy hátoldalán

A hőtani modellben a hőpartíció meghatározásához, vagyis a tengely és csapágy oldalak közötti „hőmérsékleti egyensúly” eléréséhez többféle eszközzel – lézeres hőmérővel, termoelemmel és termokamerával – mért hőmérsékleti adatokat használhatunk fel (25. ábra).

2.5 Acél / elasztomer csúszópár vizsgálata

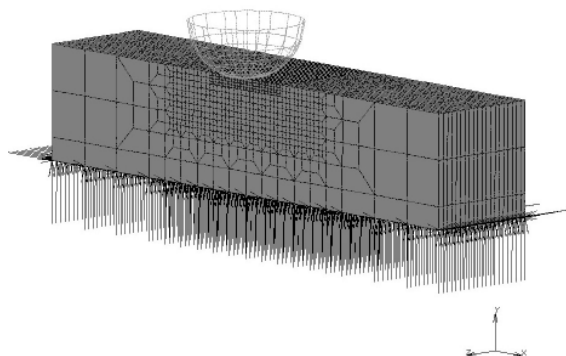
A mérés során egy golyót egy gumilapba nyomtunk, majd a golyót alternáló mozgásra kényszerítettük és mértük a reakcióerőket, amelyből meghatározható a súrlódási tényező nagysága a golyó pozíciójának függvényében. A modellezés során (27. ábra) ennek a mérésnek az eredményeit próbáltuk reprodukálni különös figyelmet fordítva a súrlódási tényező hiszterézis komponensének meghatározására.



26. ábra.

A mérési elrendezés vázlata

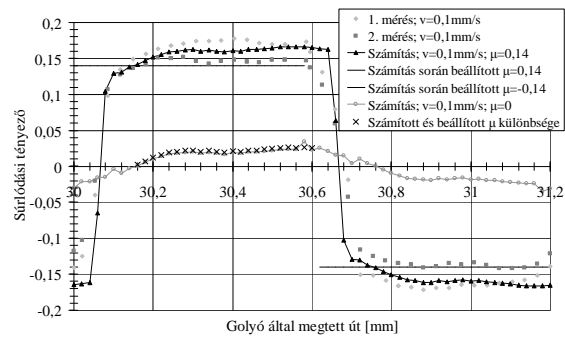
A modellezés célja, hogy „leválasszuk” a mérésből kapott súrlódási tényezőből a hiszterézis okozta komponenst. A teljes mért súrlódási tényező tartalmazza a hiszterézis, a folyadékfilmnyírás és a vegyes súrlódási állapotból adódó hatásokat. Vegyes súrlódási állapot esetében foltokban kialakulhat gumi-fém érintkezés, így adhéziónak kialakulásával is számolnunk kell. A hiszterézisből származó súrlódási tényező leválasztásához a mérésből származó súrlódási tényezőt tehát két tagra kell felosztani: egy hiszterézist jellemző tagra és egy a folyadékfilmnyírást és vegyes súrlódást együttesen tartalmazó súrlódási tényező tagra. A hiszterézis okozta súrlódási tényező a gumi veszteségi tényezőjéből származik, ami az általános Maxwell modell segítségével vehető figyelembe a szimuláció során.



27. ábra.

A gumilap és golyó csúszásának végesselemes modellje

A 28. ábra a fekete vonal az iteratív számítás során előírt folyadékfilmnyírást és vegyes súrlódást figyelembe vevő súrlódási tényezőt jelöli. A különálló világosszürke rombuszok és négyzetek a mért súrlódási tényező értékeit, a folytonos szürke vonallal összekötött körök a $\mu=0$ számítás eredményeit, a folytonos fekete vonallal összekötött fekete háromszögek az iteratív számítás eredményeit, a fekete keresztek pedig az iterált számítás eredményeinek és a beállított súrlódási tényező különbségét mutatják. Az ábrákon látható 1. és 2. mérés azt jelenti, hogy minden mérés kétszer került elvégzésre, a mérési eredmények kísérleti reprodukálhatóságának ellenőrzése céljából.



28. ábra.

A súrlódási tényező a golyó által megtett út függvényében, $F=100 \text{ mN}$ -os terhelés és $v=0.1 \text{ mm/s}$ -os maximális sebesség esetén